



132/2021

25 de noviembre de 2021

*Carlos Llorente Aguilera\**

**Investigación forense nuclear  
como herramienta fundamental  
en la lucha contra el terrorismo  
nuclear**

**Investigación forense nuclear como herramienta fundamental en  
la lucha contra el terrorismo nuclear**

**Resumen:**

El presente artículo ofrece un estudio del origen, empleo y momento actual de la investigación forense nuclear, como disciplina responsable del examen de materiales nucleares y radiactivos fuera de control con el fin de poder atribuirles un origen. La utilización de esos materiales por parte de organizaciones terroristas es considerada como una grave amenaza para la paz y la seguridad. Precisamente el conocimiento de la procedencia de estos materiales permite la adopción de medidas de seguridad o la modificación y adaptación de las existentes con el fin de evitar su desaparición de las localizaciones en las que deben estar custodiados y su eventual empleo por parte de grupos terroristas.

**Palabras clave:**

Nuclear, forense, terrorismo, radiactivo, OIEA.

**\*NOTA:** Las ideas contenidas en los *Documentos de Opinión* son responsabilidad de sus autores, sin que reflejen necesariamente el pensamiento del IEEE o del Ministerio de Defensa.

## *Nuclear forensics as a fundamental tool in the fight against nuclear terrorism*

### *Abstract:*

*This article offers a study of the origin, use and current moment of nuclear forensic investigation, as a discipline responsible for examining nuclear and radioactive materials out of control in order to attribute an origin to them. The use of these materials by terrorist organizations is considered a serious threat to peace and security. Precisely the knowledge of the origin of these materials allows the adoption of security measures or the modification and adaptation of the existing ones in order to avoid their disappearance from the locations where they must be guarded and their eventual use by terrorist groups.*

### *Keywords:*

*Nuclear, forensics, terrorism, radioactive, IAEA.*

### **Cómo citar este documento:**

LLORENTE AGUILERA, Carlos. *Investigación forense nuclear como herramienta fundamental en la lucha contra el terrorismo nuclear*. Documento de Opinión IEEE 132/2021.

[https://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs\\_opinion/2021/DIEEEO132\\_2021\\_CARLLO\\_Forense.pdf](https://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs_opinion/2021/DIEEEO132_2021_CARLLO_Forense.pdf) y/o [enlace bie<sup>3</sup>](#) (consultado día/mes/año)

## Introducción

El 13 de abril de 2005, la Asamblea General de las Naciones Unidas adoptó el Convenio internacional para la represión de los actos de terrorismo nuclear<sup>1</sup>, en cuyo preámbulo se indicaba que «los actos de terrorismo nuclear pueden acarrear consecuencias de la máxima gravedad y amenazar la paz y la seguridad internacionales». En la lucha contra este tipo de terrorismo, los Estados y las organizaciones internacionales se han visto en la obligación de dotarse de las mejores herramientas con el fin de enfrentarse a la amenaza, y entre ellas destaca la investigación forense nuclear, empeñada en localizar el origen del material nuclear hallado fuera de la ubicación en la que debería ser empleado o custodiado. Este artículo pretende poner de relieve la importancia de la investigación forense nuclear como medio imprescindible para la evitación de atentados terroristas mediante el empleo de materiales nucleares y radiactivos.

## Definiciones y conceptos

En primer lugar, cuando se habla de investigación forense nuclear, y según el Organismo Internacional de Energía Atómica (en adelante OIEA), se hace referencia al «examen de material nuclear u otro material radiactivo, o de pruebas que estén contaminadas con radionucleidos, en el contexto de procedimientos judiciales de conformidad con el derecho internacional o nacional relacionados con la seguridad física nuclear»<sup>2</sup>.

En cuanto a la diferencia entre materiales nucleares y radiactivos, es conveniente remitirse a la Ley 25/1964, de 29 de abril, sobre energía nuclear, de España, en cuyo artículo segundo, apartado 8 se definen las sustancias nucleares como:

- i. Los combustibles nucleares, salvo el uranio natural y el uranio empobrecido, que por sí solos o en combinación con otras sustancias puedan producir energía mediante un proceso automantenido de fisión nuclear fuera de un reactor nuclear<sup>3</sup>.

---

<sup>1</sup> “International Convention for the Suppression of Acts of Nuclear Terrorism”, *United Nations General Assembly*, Resolution A/RES/59/290 adopted by the General Assembly at its 91st plenary meeting, 13 de abril de 2005.

<sup>2</sup> “Nuclear Forensics in Support of Investigations”, OIEA, Viena, 2015, disponible en <https://www.iaea.org/publications/10797/nuclear-forensics-in-support-of-investigations>.

<sup>3</sup> Paradójicamente, el uranio natural puede ser empleado como combustible nuclear en las centrales canadienses tipo CANDU, lo que no parece haber sido tenido en cuenta por la legislación española.

ii. Los productos o desechos radiactivos.

En el mismo artículo, pero en el apartado 2, se define al material radiactivo como el «que contenga sustancias que emitan radiaciones ionizantes».

Las posibilidades a disposición de las organizaciones e individuos que tengan el propósito de cometer atentados son la fabricación de un artefacto nuclear improvisado (IND, por sus siglas en inglés), de un dispositivo de dispersión radiológica (RDD, por sus siglas en inglés) y de un dispositivo de exposición a la radiación (RED, por sus siglas en inglés)<sup>4</sup>. La primera opción es la menos probable ya que a la dificultad del diseño del arma y del acopio de los materiales para su construcción hay que añadir la obtención del uranio o plutonio para que se produzca la explosión nuclear, encontrándose custodiados estos materiales en instalaciones de máxima seguridad. La fabricación de un RDD es más accesible, ya que únicamente es necesario obtener el material radiactivo y adosarle un explosivo convencional que permita su dispersión. Respecto a la fabricación de un RED, es la opción que cuenta con mayores facilidades en su ejecución, ya que solo es necesario esconder una fuente radiactiva cerca del objetivo para que este quede afectado por la radiación. No están documentados casos en los que hayan sido empleados IND, aunque sí es cierto que Al Qaeda manifestó en su momento interés en su uso, juzgándose además por parte de especialistas que esta posibilidad era real<sup>5</sup>. Respecto a la fabricación de un RDD hay constancia de varios eventos, destacando el ocurrido en Chechenia el 29 de diciembre de 1998, dentro del conflicto mantenido entre el Gobierno ruso y las fuerzas separatistas chechenas, encontrándose un recipiente conteniendo elementos radiactivos, al que se había añadido una mina<sup>6</sup>. También respecto a la utilización de un RED existen casos documentados, destacando el relativo al científico chino Gu Tianming, condenado en 2003 por haber emplazado iridio 192 en el puesto de trabajo de un colega en un hospital de Guangzhou, siendo afectadas por la radiación emitida varias docenas de personas que transitaron por el centro<sup>7</sup>.

<sup>4</sup> FERGUSON, Charles D. y POTTER, William C., "The Four Faces of Nuclear Terrorism", *Monterey Institute of International Studies*, Monterey, 2004.

<sup>5</sup> The Commission on the Intelligence Capabilities of the United States Regarding Weapons of Mass Destruction, "Report to the President of the United States, March 31, 2005", disponible en [https://govinfo.library.unt.edu/wmd/report/wmd\\_report.pdf](https://govinfo.library.unt.edu/wmd/report/wmd_report.pdf).

<sup>6</sup> "Container with Radioactive Substances Found in Chechnya", *Nuclear Threat Initiative*, disponible en <https://www.nti.org/analysis/articles/container-radioactive-substances-found-chechnya/>. Fecha de la consulta 02.10.2021.

<sup>7</sup> "News in brief", *Nature* 425, 552 (2003), disponible en <https://doi.org/10.1038/425552a>.

Es obligado mencionar la normativa y los tratados y estrategias existentes como medios para luchar contra el terrorismo nuclear y radiológico. En España, puede citarse la Ley Orgánica 10/1995, de 23 de noviembre, del Código Penal, en cuyo Libro II. Delitos y sus penas, Título XVII. De los delitos contra la seguridad colectiva, Capítulo I. De los delitos de riesgo catastrófico, se encuentra la Sección 1.<sup>a</sup> De los delitos relativos a la energía nuclear y a las radiaciones ionizantes. Esta sección consta de cinco artículos, del 341 al 345, que contemplan los delitos en los que intervengan elementos nucleares y radiactivos, tales como su liberación al medio, la producción, tráfico, posesión o almacenamiento. Además, en el Título XXII. Delitos contra el orden público, Capítulo VII. De las organizaciones y grupos terroristas y de los delitos de terrorismo, Sección 1.<sup>a</sup> De las organizaciones y grupos terroristas, se encuentra el artículo 574 que contempla las penas para aquellos que tengan, depositen, fabriquen, trafiquen, transporten, suministren, coloquen o empleen «armas, sustancias o aparatos nucleares, radiológicos, químicos o biológicos, o cualesquiera otros de similar potencia destructiva». También es relevante la Estrategia de Seguridad Nacional de 2017, con un total de cinco objetivos desarrollados en quince ámbitos, entre los que se encuentra el de la no proliferación de armas de destrucción masiva, sustanciado en ocho líneas de acción la mayor parte de las cuales tiene relación directa con la lucha contra el terrorismo nuclear y radiológico<sup>8</sup>.

En el espacio europeo pueden citarse el Plan de acción de la Unión Europea sobre la seguridad Química, Biológica, Radiológica y Nuclear (QBRN), adoptado en 2009<sup>9</sup>, en el que se atendía a cuestiones de seguridad relacionadas con la prevención, la detección y la preparación y respuesta ante eventos con implicación de materiales QBRN<sup>10</sup>; la Estrategia de seguridad interior de la Unión Europea, que detalla diversos objetivos, el segundo de los cuales, sobre prevención del terrorismo y abordaje de la radicalización y

---

<sup>8</sup> La Estrategia se ve complementada por el Informe Anual de Seguridad Nacional, disponible en <https://www.dsn.gob.es/es/estrategias-publicaciones/informe-anual-seguridad-nacional>.

<sup>9</sup> “Council conclusions on strengthening chemical, biological, radiological and nuclear (CBRN) security in the European Union. An EU CBRN Action Plan. Adoption”, *Consejo de la Unión Europea*, 12 de noviembre de 2009, 15505/1/09/REV 1, disponible en <https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-15505-2009-REV-1/en/pdf>.

<sup>10</sup> Los aspectos QBRN, a pesar de hacer referencia a ámbitos distintos, suelen tratarse en el área de la seguridad de una manera conjunta. Para una mayor información sobre los esfuerzos realizados para la lucha contra el terrorismo biológico es recomendable el artículo «La Convención de armas biológicas frente a nuevas amenazas» de María de los Ángeles Cuadrado Ruiz, disponible en: <https://digibug.ugr.es/handle/10481/47101>. En lo relativo al terrorismo químico destaca la nota de la Secretaría de la Organización para la Prohibición de las Armas Químicas relativa a los medios disponibles para la lucha mundial contra el terrorismo, disponible en [https://www.opcw.org/sites/default/files/documents/S\\_series/2002/es/S\\_294\\_2002-ES.pdf](https://www.opcw.org/sites/default/files/documents/S_series/2002/es/S_294_2002-ES.pdf).

la captación, especifica una de las maneras de actuar es evitando el acceso no autorizado a los materiales QBRN<sup>11</sup>; y, finalmente, la Estrategia de la Unión Europea para una Unión de la Seguridad, de 2020, en la que se indican cuatro prioridades estratégicas, entre las que se encuentra la protección frente al terrorismo y la delincuencia organizada en la que se procede a la exposición de distintos objetivos en el ámbito QBRN<sup>12</sup>.

En el área de acción del OIEA destaca la aprobación de la Convención sobre la protección física de los materiales nucleares, con los compromisos adquiridos por los Estados para evitar que los materiales sensibles caigan en manos inapropiadas<sup>13</sup>. También pueden señalarse diversas resoluciones del Consejo de Seguridad de las Naciones Unidas, como la 1373, de 2001, en la que se exponía la preocupación por el vínculo existente entre terrorismo internacional y el tráfico de materiales nucleares<sup>14</sup>, o la 1540, de 2004, en la que se apelaba a los Estados para que no apoyasen a agentes no estatales que tuviesen intención de producir armas nucleares o sus vectores<sup>15</sup>.

## Antecedentes

El origen de la investigación forense nuclear puede situarse en el año 1996, en el que mediante una iniciativa del G-8 se instauró el Nuclear Forensics International Technical Working Group con el objetivo de reunir a expertos que pudieran aportar sus conocimientos sobre ciencia forense para ofrecer una respuesta al tráfico ilícito de material nuclear y radiactivo<sup>16</sup>.

Otro hito que destaca por su trascendencia es el informe de 2004 *Model Action Plan for Nuclear Forensics and Nuclear Attribution*, en el que se enunciaban los principios

---

<sup>11</sup> "Estrategia de seguridad interior de la Unión Europea", Consejo Europeo, marzo de 2010, disponible en <https://www.consilium.europa.eu/media/30738/qc3010313esc.pdf>.

<sup>12</sup> "Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones sobre la Estrategia de la UE para una Unión de la Seguridad", Comisión Europea, COM(2020) 605 final, 24 de julio de 2020, disponible en <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0605&from=ES>.

<sup>13</sup> "The Text of the Convention on the Physical Protection of Nuclear Material", OIEA, Circular informativa INFCIRC/274/Rev. 1, mayo de 1980, disponible en <https://www.iaea.org/sites/default/files/infcirc274r1.pdf>.

<sup>14</sup> Consejo de Seguridad de las Naciones Unidas, "Resolución 1373 (2001)", aprobada por el Consejo de Seguridad en su 4385ª sesión (S/RES/1373 (2001), 28 de septiembre de 2001.

<sup>15</sup> Consejo de Seguridad de las Naciones Unidas, "Resolución 1540 (2004)", aprobada por el Consejo de Seguridad en su 4956ª sesión (S/RES/1540 (2004), 28 de abril de 2004.

<sup>16</sup> "Home", ITWG, disponible en <http://www.nf-itwg.org/>. Fecha de la consulta 05.10.2021.

fundamentales de esta disciplina<sup>17</sup>. El objetivo de la investigación forense nuclear es el de atribuir un origen al material nuclear o radiactivo encontrado en el marco del tráfico ilícito, para lo que se proponen como herramientas básicas el empleo del análisis forense de muestras nucleares, la comprensión de sus firmas radioquímicas, la comprensión de las firmas ambientales para diferenciarlas de aquellas que se investigan, el conocimiento de los métodos empleados para la producción de materiales nucleares; un conocimiento del proceso de desarrollo de armas nucleares y una adecuada información de fuentes de inteligencia.

En el año 2006, apareció el manual *Nuclear Forensics Support*, que recogía el contenido de la anterior publicación, lo que permitió a los diferentes Estados contar con una guía adecuada para la implementación de la investigación forense nuclear, ya que en él se detallaba el plan de acción a desarrollar en el caso de localizarse material nuclear o radiactivo<sup>18</sup>.

### Situación actual

Actualmente, se encuentra en vigor la guía de implementación *Nuclear Forensics in Support of Investigations*, de 2015, que constituye un eficaz medio para ayudar a los Estados a cumplir con sus obligaciones en materia de seguridad nuclear. En esta guía se observan algunos cambios respecto a la anterior publicación de 2006, y se define la forma de llevar a cabo la investigación forense nuclear, según el modelo del plan de acción.

La investigación forense nuclear no se emplea aislada, y debe formar parte de un proceso amplio de modo que se ofrezca a las autoridades la información oportuna para la correcta toma de decisiones. Así, una vez ha tenido lugar un incidente en el que se presume el empleo de materiales nucleares o radiactivos, se produce la respuesta al evento mediante una operación en la que pueden intervenir unidades de respuesta NBQR. Una vez recogido el material de la escena, se transporta hasta el laboratorio tomando las necesarias medidas de seguridad. Allí se llevará a cabo un plan de examen

<sup>17</sup> KRISTO, M. J., SMITH, D. K., NIEMEYER, S. y DUDDER, G. B., "Model Action Plan for Nuclear Forensics and Nuclear Attribution", *Lawrence Livermore National Laboratory*, United States Department of Energy, 3 de marzo de 2004, disponible en [https://lnl.primo.exlibrisgroup.com/discovery/delivery/01LLNL\\_INST:01LLNL\\_INST/1245883490006316](https://lnl.primo.exlibrisgroup.com/discovery/delivery/01LLNL_INST:01LLNL_INST/1245883490006316).

<sup>18</sup> "Nuclear Forensics Support", OIEA, Viena, 2006, disponible en [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1241\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1241_web.pdf).

forense, con los requisitos de las pruebas que se realizarán en apoyo de un posible proceso penal o con el fin de dar una respuesta adecuada al evento. Asimismo, es necesario un plan de análisis forense con una descripción de los tipos de análisis a efectuar según los requisitos de la investigación. A continuación, se procede al trabajo forense con un análisis tradicional junto al nuclear, de los que derivarán las interpretaciones que lleven a las conclusiones forenses, entre las que deberá destacar el origen del material nuclear o radiactivo. También se detalla la obligación de los Estados de contar con planes de respuesta ante situaciones que afecten a la seguridad nuclear, resaltándose la importancia de que este modelo de plan de acción se incorpore a los mismos.

El valor que ha ido adquiriendo la investigación forense nuclear queda puesto de manifiesto en la guía de seguridad nuclear *Establishing the Nuclear Security Infrastructure for a Nuclear Power Programme*, en la que se reitera la necesidad de que los Estados que dispongan de un programa de energía nuclear implementen las herramientas forenses necesarias para mantener la seguridad de este<sup>19</sup>.

Las perspectivas de desarrollo que se abren a la investigación forense nuclear son ilimitadas y en la conferencia internacional *Advances in Nuclear Forensics: Countering the Evolving Threat of Nuclear and Other Radioactive Material out of Regulatory Control*, de 2014, ya se apuntaban cuatro retos a afrontar en los siguientes cinco años, y que eran el desarrollo continuo de los recursos humanos, la promoción de nuevas herramientas y métodos analíticos, el examen de cómo mantener las capacidades técnicas en investigación forense nuclear y el compromiso internacional en el ámbito estratégico<sup>20</sup>.

### Herramientas empleadas

Son diversas las herramientas a emplear en el transcurso de una investigación forense nuclear y pueden encuadrarse en tres categorías, como son las herramientas de análisis

<sup>19</sup> "Establishing the Nuclear Security Infrastructure for a Nuclear Power Programme", OIEA, Viena, 2013, disponible en [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1591\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1591_web.pdf).

<sup>20</sup> "Advances in Nuclear Forensics: Countering the Evolving Threat of Nuclear and Other Radioactive Material out of Regulatory Control", OIEA, Summary of an International Conference, Vienna, Austria, 7-10 July 2014, disponible en [https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1706\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1706_web.pdf).

masivo elemental e isotópico, las herramientas de imagen y las herramientas de microanálisis<sup>21</sup>.

### ***Herramientas de análisis masivo elemental e isotópico***

Estas técnicas permiten determinar la composición de una muestra, tanto en lo que se refiere a los elementos de la tabla periódica que contiene como a su representación isotópica.

#### *Técnicas radiométricas*

Su propósito es el de medir el tipo y la tasa de dosis de radiación emitida por los elementos radiactivos de una muestra. Algunos elementos se caracterizan por su inestabilidad lo que hace que experimenten una desintegración radiactiva, en la cual los núcleos atómicos emiten radiación en forma de partículas o de energía<sup>22</sup>. Cada elemento tiene una forma distinta de desintegrarse, pudiendo esto apreciarse por el tipo de radiación emitida o por su periodo de semidesintegración. Precisamente mediante aparatos de medida de los tipos de radiación emitida por una muestra es posible averiguar en primera instancia su composición elemental e isotópica.

#### *Espectrometría de masas*

Esta moderna técnica permite realizar un análisis dotado de extrema precisión de las concentraciones y proporciones de isótopos de elementos presentes en una muestra de estudio. Se basa en la generación de iones a partir de la muestra a estudiar y su posterior separación en base a la relación masa/carga de los mismos, de modo que se pueda llevar a cabo un análisis cuantitativo y cualitativo que determine cuáles son los isótopos existentes<sup>23</sup>.

<sup>21</sup> KRISTO, M. J. "Nuclear Forensics", en Michael F. L'Annunziata. (Ed.), "Handbook of Radioactivity Analysis", Volumen 2 "Radioanalytical Applications", 921-951, Academic Press, Londres, 2020.

<sup>22</sup> Office of the Assistant Secretary of Defense for Nuclear, Chemical and Biological Defense Programs, "The Nuclear Matters Handbook, Expanded Version", 2011, disponible en <https://fas.org/man/eprint/NMHB2011.pdf>.

<sup>23</sup> GROSS, J. H., *Mass Spectrometry. A Textbook*, Springer, Heidelberg, 2004.

### *Ensayo químico*

En este apartado pueden encuadrarse dos técnicas, las cuales son la titulación química y la coulombimetría, y ambas tienen como finalidad determinar la concentración de elementos nucleares en una determinada muestra considerada como objeto de estudio<sup>24</sup>.

### *Radioquímica*

Esta herramienta puede ser utilizada para facilitar la separación de los isótopos radiactivos presentes en la muestra a estudiar, y consiste básicamente en la separación por medios químicos de los elementos componentes en base a sus distintas propiedades. Esta técnica, unida a las herramientas expuestas en los apartados anteriores, permite una identificación plena de los elementos componentes en el material objeto del análisis.

### **Herramientas de imagen**

También puede obtenerse información que pueda ayudar en la caracterización de las muestras mediante su inspección visual, atendiendo a su aspecto, forma, textura y otros parámetros. Un análisis visual más profundo de las muestras puede llevarse a cabo gracias al empleo de microscopios ópticos y de microscopios electrónicos de barrido. También puede ser de utilidad el empleo de la auto radiografía, procedimiento que aprovecha la emisión de radiación de un material para obtener una imagen particular del mismo<sup>25</sup>.

### **Herramientas de microanálisis**

---

<sup>24</sup> "Nuclear Forensics in Support of Investigations. Implementing Guide", OIEA, 54.

<sup>25</sup> PARSONS-DAVIS, T., KNIGHT, K., FITZGERALD, M., STONE, G., CALDEIRA, L., RAMON, C. y KRISTO, M., "Application of Modern Autoradiography to Nuclear Forensic Analysis", Forensic Science International 286, C (2018), disponible en [doi.org/10.1016/j.forsciint.2018.03.027](https://doi.org/10.1016/j.forsciint.2018.03.027).

En esta categoría se incluyen herramientas que, una vez se ha comprobado que la composición de la muestra a analizar es heterogénea, se emplean para llevar a cabo una inspección que logre identificar los elementos constitutivos de la misma. Las principales técnicas empleadas en este apartado se basan en el empleo de rayos X o de la espectrometría de masas de iones secundarios<sup>26</sup>.

### Exposición de un caso

Un interesante caso de investigación forense nuclear fue el desarrollado en 2003 en el Instituto de Elementos Transuránicos, de Karlsruhe. En este caso se recibieron para su análisis en el centro cuatro muestras de uranio en forma de pastillas, del tipo empleado en la fabricación de los elementos combustibles, que se utilizan normalmente en las centrales nucleares<sup>27</sup>.

A fin de llevar a cabo una investigación integral de las muestras, se hizo necesario practicarles diversas pruebas, cuyos resultados conjuntos permitieron extraer las conclusiones que derivaron en la atribución de un origen cierto e indubitado. Un primer paso fue el de la descripción de la apariencia y forma de las muestras y la obtención de sus pesos y medidas, lo que, mediante la consulta de la base de datos adecuada, puede indicar el tipo de reactor en el que es empleado.

A continuación, se llevó a cabo un primer análisis de la muestra mediante el empleo de la espectrometría gamma de alta resolución, que permitió identificar el uranio como el elemento componente de la misma. El posterior análisis de esta muestra mediante un software especializado permitió averiguar, de forma inicial, el enriquecimiento del uranio en el isótopo 235, alrededor del 2 %.

Posteriormente se aplicaron técnicas más precisas a fin de obtener unos resultados definitivos, como fueron la espectrometría de masas, que confirmó la composición isotópica de la muestra y el enriquecimiento al 2 % en U235, y tres técnicas más denominadas titulación potenciométrica, un software de determinación de concentraciones de uranio y plutonio y la espectrometría de masas con dilución isotópica,

<sup>26</sup> KEEGAN, E., KRISTO, M., TOOLE, K., KIPS, R. y YOUNG, E., "Nuclear Forensics: Scientific Analysis Supporting Law Enforcement and Nuclear Security Investigations", *Analytical Chemistry* 88, (2016), 1496-1505, disponible en doi: 10.1021/acs.analchem.5b02915.

<sup>27</sup> WALLENIUS, M., MAYER, K. y RAY, L., "Nuclear forensic investigations: Two case studies", *Forensic Science International* 156 (2006), 55–62, disponible en doi:10.1016/j.forsciint.2004.12.029.

que permitieron averiguar la cantidad de uranio presente en la muestra, que en este caso correspondía con la esperable en el dióxido de uranio, componente de las pastillas de combustible nuclear.

Otra prueba fue la identificación de las impurezas presentes en la muestra, mediante la espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente, que permitió averiguar de una manera cuantitativa los elementos de la tabla periódica existentes. La determinación de estas impurezas puede ofrecer indicios del proceso de producción del material del que proviene la muestra, lo que tiene su utilidad en la localización del emplazamiento de su origen.

La prueba practicada a continuación fue la determinación de la edad de la muestra, que permite conocer la fecha en la que fue fabricada. Para ello, se aprovechó la desintegración radiactiva de los isótopos del uranio y el conocimiento de sus periodos de semidesintegración lo que arrojó como fecha probable de fabricación la de finales de 1990.

Todas estas pruebas, más la oportuna consulta de la amplia base de datos a disposición de los investigadores del Instituto, permitieron identificar el tipo de reactor nuclear que empleaba las pastillas de combustible objeto de las pesquisas, y que correspondía a un reactor RBMK-1500, diseñado y empleado en su momento en la Unión Soviética, el cual solo se encuentra en la central nuclear de Ignalina, localizada en Lituania. El combustible empleado en esa central era únicamente fabricado por la empresa rusa MZ ELECTROSTAL, lo que permitió finalmente averiguar el origen de las muestras.

Mediante una última consulta a la Base de Datos sobre Incidentes y Tráfico Ilícito del OIEA, se pudo comprobar que en el año 1992 habían sido robadas importantes cantidades de combustible nuclear de la mencionada planta de Ignalina. Este hecho, unido al resto de la información obtenida, llevó a los investigadores a concluir que las muestras analizadas pertenecían a ese episodio en particular.

## Conclusiones

Tras lo expuesto en los apartados precedentes, parece oportuno extraer las siguientes conclusiones:

La amenaza terrorista llevada a cabo mediante el empleo de materiales nucleares y radiactivos es real y de este modo lo entienden y estiman los principales actores de la comunidad internacional. Esta amenaza, si bien se ha manifestado con cierta tibieza en el pasado, podría ser capaz de despuntar en cualquier momento, máxime si se tienen en cuenta el elevado número de fuentes radiactivas que se siguen encontrando fuera del espacio en el que deberían estar confinadas y el gran rendimiento que un grupo terrorista podría extraer de su empleo en el transcurso de un atentado, debido ello fundamentalmente a las catastróficas consecuencias que acarrearía sobre la actividad económica y sobre el mantenimiento del orden establecido y de la seguridad ciudadana.

Las herramientas implementadas para responder convenientemente a esta amenaza son de muy variada naturaleza, destacando por su relevancia y por su imparable avance y progresión la investigación forense nuclear, objeto principal de la atención de este artículo. Esta disciplina ha sido impulsada hasta lograr su acomodo e implantación en el ámbito internacional gracias al decidido apoyo del OIEA y de los principales países y organizaciones implicados en el control de los materiales nucleares y radiactivos y en la lucha antiterrorista, lo que ofrece una muestra extraordinaria de su importancia en el reciente pasado hasta llegar al momento actual, y de su esperanzadora proyección en el futuro.

La investigación forense nuclear se vale en sus cometidos de un nutrido y complicado arsenal de técnicas y procedimientos provenientes de distintas ramas del conocimiento, lo que la hace al mismo tiempo compleja y tremendamente abierta al desarrollo y a la innovación, siendo fundamental para su correcta aplicación la cooperación internacional y la guía y tutelaje de entidades supranacionales como el OIEA.

Como ya ha quedado expuesto, no se trata de una disciplina que se encuentre en ciernes, sino que, y a pesar de su corta historia, se halla perfectamente asentada en el complejo entramado constituido por el esfuerzo de la lucha antiterrorista. Además, ha demostrado que es capaz de ofrecer respuestas oportunas y pertinentes a los problemas que se le plantean en su ámbito de aplicación, lo que ha acabado por convertirla en una herramienta fundamental e imprescindible con la que los Estados cuentan para contribuir al reforzamiento de su seguridad.

Esta disciplina es además de gran interés para las Fuerzas Armadas, ya que en determinadas circunstancias podrían verse involucradas en el curso de una investigación

forense nuclear. Un ejemplo de ello sería la misión de toma de muestras de acuerdo con los parámetros de los laboratorios de referencia, a realizar por unidades NBQ que estén dotadas con Equipo de Muestreo e Identificación de Agentes Biológicos, Químicos y Radiológicos (SIBCRA, por sus siglas en inglés), siendo este uno de los aspectos que podrían ser potenciados en un futuro.

*Carlos Llorente Aguilera\**  
Capitán de Infantería, especialista en Defensa NBQ  
Doctor en Historia Contemporánea